VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou

Time Coordination of Connections in Capacity Limited Terminals

Student: Bc. Vladislav Dušek

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání diplomové práce

Student:	**Bc. Vladislav Dušek**
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace:	30 Technologie dopravy
Téma:	Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou Time Coordination of Connections in Capacity Limited Terminals
Jazyk vypracování:	čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Vytvořit matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupních uzlech a na zadaných úlohách otestovat jeho funkčnost a výkonnost.

Osnova práce:
1. Úvod.
2. Význam a charakteristika koordinačních úloh v dopravě.
3. Analýza současného stavu poznání v oblasti koordinačních úloh.
4. Návrh matematického modelu.
5. Experimentální část práce - testování navrženého modelu na zadaných úlohách.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý, J.; Kluvánek, P.: Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: VEDA. 1990. ISBN 80-224-0099-9.
Janáček, J.: Optimalizace na dopravních sítích. Žilina: ŽU v Žilině. 2003. 248 s. ISBN 80-8070-031-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016
Datum odevzdání: 15.05.2017

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA
Fakulta strojní
3
OSTRAVA

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě………………….

…..……………………...

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě…...............

……………………..
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Vladislav Dušek

Adresa trvalého bydliště autora práce: Třanovského 384, Frýdek-Místek, 738 01

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě vyjádřit velké poděkování doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za veškerou pomoc během studia a při vypracování této diplomové práce, za jeho trpělivost, ochotu a cenné rady při poskytovaných konzultacích.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DUŠEK, V. *Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou*.

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2017. 48 stran. Diplomová práce, vedoucí práce: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou časové koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou.

Úvodní kapitoly diplomové práce jsou věnované významu časové koordinace pro veřejnou hromadnou dopravu. Dále jsou popsané základní poznatky týkající se tvorby lineárních matematických modelů. Současně je popsán optimalizační software Xpress-IVE, ve kterém je navržený model testován z hlediska jeho funkčnosti a výkonnosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

DUŠEK, V. *Time Coordination of Connections in Capacity Limited Terminals*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2017, 48 p. Thesis head: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

This master thesis deals with problematics of time coordination of connections at transfer nodes with limited capacity.

The introductory chapters of this thesis focus on the importance of time coordination for public transport. Further, basic knowledge of the creation of linear mathematical models is described. Final part discusses optimization software Xpress-IVE in which the proposed model is tested in terms of functionality and efficiency.

OBSAH

1 ÚVOD

Jednou z hlavních myšlenek zvýšené propagace a podpory dalšího zavádění městské hromadné dopravy v dnešní době je motivace snižovat kongesce, emise a hluk z individuální automobilové dopravy, tedy faktorů, které mají podstatný vliv na kvalitu života obyvatelstva měst a městských aglomerací.

V souvislosti s městskou hromadnou dopravou se často skloňuje úroveň její kvality. Kvalita městské hromadné dopravy je posuzována podle její spolehlivosti, rychlosti, pohodlí a bezpečnosti v průběhu přepravy. Z pohledu cestujícího je ideálním systémem veřejné hromadné dopravy ve městech a městských aglomeracích systém umožňující přímé spojení mezi nástupním místem cestujícího do dopravního systému a poptávaným místem ukončení.

Velký počet přímých linek však kromě nepřehlednosti celého systému městské hromadné dopravy přináší zpravidla i vysokou míru neefektivity, protože u mnoha relací hrozí, že v dostupném čase nebude k dispozici dostatečný počet cestujících, kterým by spoj dané linky vyhovoval, tzn., že vozidla mohou jezdit značně nevytížená. Je tedy nezbytné některé méně významné přepravní proudy sdružovat do významnějších z pohledu vyšších intenzit. Průvodním jevem tohoto sdružování je potom nutnost v určitých místech dopravní sítě přestupovat mezi linkami. Zastávky, ve kterých cestující přestupují, jsou v literatuře označovány jako přestupní uzly. V souvislosti s přestupy cestujících v přestupních uzlech je třeba zohledňovat, aby při přestupech mezi spoji jednotlivých linek přestupujícím cestujícím nevznikaly příliš dlouhé časové prostoje. Tento negativní aspekt je možno odstranit tzv. účelnou časovou koordinací spojů. Účelností se rozumí zajištění takové časové koordinace, která se vztahuje k zatíženým přepravním proudům.

Jelikož složení přepravovaných osob může byt různorodé a to z hlediska věkové i sociální skupiny, vzniká tedy různorodá poptávka po kvalitě systému městské hromadné dopravy.

Další z výhod městské hromadné dopravy je snižování nadměrného znečišťování ovzduší ve velkých městech. Můžeme se setkat s trendem, že do některých částí velkoměst je zaváděn zákaz vjezdu vozidel, přičemž řidiči jsou nuceni odstavit svá vozidla na předem definovaných místech pro parkování, následně mohou využívat systém městské hromadné dopravy s cílem dostat se ekologičtějším způsobem k určenému místu aktivit.

V městské autobusové dopravě vzniká nárůst požadavků ze strany státu a krajů ČR na obměnu vozidlových parků z hlediska přísnějších emisních norem a ekologických kritérií. Nejnovější typy vozidel, jak v Moravskoslezském kraji, tak v ČR jsou s pohonem na stlačený zemní plyn (CNG). Na podporu zavádění ekologických paliv se prostřednictvím účelových dotací provozovatelům veřejné hromadné dopravy významnou měrou podílí Ministerstvo dopravy ČR.

Cíleným předpokladem městské hromadné dopravy je dostatečně kvalitní nabídka spojů určených k plošnému pokrytí všech oblastí města, tzn. nejen v centrech měst, ale i v jejich okrajových částech. Je na dopravci vytvořit takové podmínky, aby byl co nejvíce pokryt požadavek cestujících, kteří směřují do zaměstnání, škol nebo za kulturou či jinými veřejnými nebo privátními službami. V podvědomí každého cestujícího je myšlenka, která vyvolává pocit, že v systému městské hromadné dopravy se lze přemísťovat bez nutnosti přestupu. To je však nereálný požadavek. Tuto existenci řeší provozovatelé veřejné hromadné dopravy tím způsobem, že se snaží o časovou koordinaci spojů veřejné hromadné dopravy a to jak v úsecích dopravní sítě, tak i v uzlech dopravní sítě.

Na Institutu dopravy FS VŠB-TU Ostrava byla v minulosti řešena celá řada závěrečných prací zabývající se časovou koordinací spojů. Byly sestaveny modely, jejichž řešením je možno docílit zlepšení aktuálních situací na dopravní síti. V těchto modelech byla uplatněna optimalizační dvě kritéria – celková časová ztráta přestupujících cestujících (při časové koordinaci spojů v přestupních uzlech) a rovnoměrnost nabídky přepravy (při časové koordinaci spojů na úsecích). Byly navrženy také modely, prostřednictvím kterých lze současně provádět časovou koordinaci spojů a optimalizovat oběhy vozidel. Optimalizačním kritériem bylo koncipováno jako integrální kritérium zahrnující celkový počet nasazených vozidel, celková časová ztráta přestupujících cestujících a počet neproduktivně ujetých vzdáleností vozidly při přejezdech z konečných zastávek spojů na výchozí zastávky spojů.

Poslední z prací v této řadě byla diplomová práce zabývající se časovou koordinací spojů v podmínkách dopravního podniku Opava, jejímž autorem byl Ing. Jan Martinik. Model prezentovaný v uvedené práci zvládá koordinovat spoje ve více uzlech současně, a dokáže realizovat jak jednosměrnou tak i obousměrnou koordinaci spojů v přestupních uzlech.

Jeden z typů použitých účelových funkcí, kterou měl řešitel stanovenou, byl horní omezení doby čekání cestujících, kteří přijíždějí daným spojem do přestupního uzlu. Výsledná hodnota účelové funkce potom stanovila maximální dobu čekání v přestupním uzlu.

Řešení navržená v dané práci však mají jednu základní nevýhodu, a to shlukování koordinovaných spojů v přestupních uzlech do té míry, že počet spojů, které se ve stejný časový okamžik sjedou do určitého uzlu, překročí jeho kapacitu. Z hlediska praktického využití se jedná o poměrně zásadní nedostatek, který výrazně omezuje uplatnění výsledků modelu v reálném provozu. Vytváření shluků vozidel překračujících kapacitu uzlů neumožňuje efektivní zajištění přestupů mezi spoji různých linek, protože je nejen nepřípustné zastavování vozidel na komunikaci mimo přestupní uzly (obecně zastávky), ale nastává také zvýšené ohrožení cestujících z hlediska bezpečnosti a snižuje se plynulost přestupů.

Cílem této diplomové práce tedy bude navrhnout takovou modifikaci modelu, která umožní zohledňovat při plánování přestupů také kapacitní možnosti přestupních uzlů.

2 VÝZNAM A CHARAKTERISTIKA KOORDINAČNÍCH ÚLOH V DOPRAVĚ

2.1 VÝZNAM KOORDINAČNÍH ÚLOH V DOPRAVĚ

Základním úkolem koordinace časových poloh spojů v dopravě je, aby co nejvhodněji ovlivnila požadavky na přepravu osob v dopravní síti z hlediska požadavků cestující veřejnosti. Cestující často chápou, že přestupy jsou nezbytné, ovšem nehodlají akceptovat, když se přestupuje často a při přestupech se dlouho čeká na navazující spoje.

V osobní městské hromadné dopravě lze problém časové koordinace řešit dvojím způsobem:

1. izolované řešení časové koordinace na úsecích dopravní sítě,
2. izolované řešení časové koordinace v uzlech dopravní sítě,
3. komplexní řešení časové koordinace v síti hromadné dopravy (síťová koordinace).

V diplomové práci se zaměřím na situaci, která řeší problémy v dopravní síti pomocí časové koordinace v uzlech dopravní sítě.

V rámci městské hromadné dopravy mohou nastat situace, kdy pobyt subjektu „cestující" v uzlech dopravní sítě je nepřiměřeně dlouhý, protože každý subjekt zapojený do dopravního systému je nějak ovlivněn. Časová koordinace v uzlech dopravní sítě řeší problém minimalizace časové ztráty přestupujících cestujících. Lze to popsat tak, že čím nižších hodnot celkové časové ztráty bude dosahováno, tím bude celkové řešení lepší.

Máme dopravní síť, kde je poptávka po přepravování osob do zaměstnání škol a to jak v dopoledních hodinách ta odpoledních. Tímto způsobem dochází k shlukování spojů v určitém časovém měřítku na uzlech dopravní sítě. V tomto případě není až tak nutné provádět časovou koordinaci jelikož je poptávka pokryta nabídkou, protože spoje přijíždějící do zastávek mají krátký interval a tak doba čekání cestujících je zanedbatelná. V případě opačné nerovnoměrnosti, kde vzniká, tzn. přepravní sedlo, dochází k nízké intenzitě cestujících a tím pádem i k velkým časovým rozestupům mezi jednotlivými spoji.

Cestující jsou v tomto případě nuceni vyčkávat na příjezd dalšího spoje a to v řádech až desítek minut, což má negativní dopad na veřejné míněni o městské hromadné dopravě. V tomto případě musíme do dopravní sítě zavézt časovou koordinaci, která má vést k zlepšení plynulosti toku cestujících mezi jednotlivými uzly a rovnoměrné pokrytí spojů vozidel na časové ose v denní časové nerovnoměrnosti. Cílem tohoto opatření je co nejvíce se přiblížit minimální době, vyjadřující čekání cestujících v uzlech dopravní sítě.

2.2 CHARAKTERISTIKA KOORDINAČNÍCH ÚLOH V DOPRAVĚ

Samostatná přeprava osob nebo věci je závislá na času přepravy. Musíme tímto zajistit např. rychlejší odbavení cestujících. Tenhle proces můžeme nastavit, když dokážeme změnit jednotlivé systémy, které změní proces odbavení např. dopravní prostředek s větším počtem dveřních systému pro zrychlený nástup nebo výstup cestujících. Taktéž docílíme rychlejšího odbavení při použití moderních turniketů, které dokáží odbavit více cestujících najednou. Jedná z výhod nasazení turniketů je, že nedochází k uniku hotovosti, jak tomu bylo v minulosti. Mohli jsme se setkat s situaci, „že řidič dopravního prostředku přijal od cestujících peníze a určitý obnos hotovosti odebral rovnou do své kapsy“. Existuje několik možností, jak výše popsané problémy odstranit, nejsou však primárním tématem této diplomové práce, tudíž se nimi dále nebudu zabývat.

V každé úloze lineárního programování je určení optimalizačního kritéria (OK). V případě časové koordinace spojů v uzlech je OK hodnota účelové funkce, která vyjadřuje celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Jedním z úkolu této práce je minimalizovat hodnotu ÚF tzn. účelová funkce“.

V našem případě máme dopravní síť městské hromadné dopravy tvořenou množinou přestupních uzlů „zastávky kde přestupuje určitý počet cestujících“. Tyto uzly navštěvují linky z obou stran, a to jak ve směru příjezdu z jedné strany tak ze strany druhé tzn., že jsou obousměrně pojízdné. V dopravní síti linek MHD (městské hromadné dopravy), mohou nastat případy, že máme více atraktivních přestupních uzlů. Cestující mohu mít ochotu přestupovat ve více přestupních uzlech než v jednom a to např. z důvodu atraktivity okolí (centrum města, nákupní možnosti, pracovní příležitosti atd.) V našem případě musíme tento požadavek respektovat a reagovat na něj. Řešení situace tkví v tom, že musíme provézt časovou koordinaci ve všech uzlech což je v našem případě nelehký úkol. Máme situace, kde s posunem spojů některých linek nelze pohybovat a to z důvodů návaznosti jiných spojů, které se mají shlukovat v daném přestupním uzlu.

Optimalizačním kritériem v našem případě bude celková časová ztráta v přestupních uzlech, jejíž hodnotu se snažíme minimalizovat. Celkovou časovou ztrátu mezi přijíždějícím spojem do uzlu a odjíždějícím spojem ovlivňuje taky počet cestujících, kteří chtějí v daném uzlu přestupovat. Jestliže se bude nadměrná doba čekání cestujících v dopravním uzlu zvyšovat, tak s dobou čekání počet přestupujících cestujících exponenciálně vroste. Tento vliv bude mít negativní dopad na rozvoj veřejné hromadné dopravy, a zároveň sníží její pozitivní potenciál.

Musíme konstatovat, že snížení přestupní doby v uzlech dopravní sítě má za následek zvýšení atraktivity veřejné hromadné dopravy. Další z negativních dopadů na časovou rovnoměrnost dopravních spojů má počet použitých vozidel. Příliš velký počet použitých vozidel bude mít negativní dopad na ekonomiku dopravního podniku a celkového dopravního systému. Použitím velkého počtu vozidel nám vnikne shlukování v dopravní síti a to jak v uzlech dopravní sítě, tak i na úsecích. Naopak neúměrné snižování počtu nasazených vozidel může mít za následek zvyšování časové ztráty v přestupních uzlech.

Musíme najít optimalizační polohu, jak pro uspokojení přestupujících cestujících v uzlech dopravní sítě, tak i na ekonomickou hospodárnost dopravních podniků s použitím vozidel v dopravním systému. Zvyšování atraktivity dopravního systému znamená vytvořit takovou nabídku dopravních spojů, které dokážou pokrýt nerovnoměrné rozložení přestupních uzlů, tak aby vznikly co nejmenší časové ztráty. Časovou ztrátu můžeme snížit např. slučováním spojů, nebo jestliže máme po příjezdu na konečný uzel dopravní sítě časový rozptyl pro odjezd následujícího spoje, použijeme neproduktivní čas pro obsluhu jiné trati v dopravní síti.

Jestliže bychom chtěli provádět časovou koordinaci spojů mezi jednotlivými uzly, přičemž bychom se zaměřili pouze na jeden směr jízdy dopravní obslužnosti, vznikla by časová koordinace na úsecích dopravní sítě. Řešitel této okolnosti se musí rozhodnout, mezi jakými úseky neboli mezi kterými dopravnímu uzly bude provádět zmiňovanou časovou koordinaci. Optimalizačním kritériem se stává časová ztráta cestujících a to v různých polohách přestupních uzlů.

Vhodným matematickým simulačním nástrojem pro řešení časových koordinací v přestupních uzlech dopravní sítě je bezpochyby lineární programování, které použiju i v této diplomové práci. V řešených úlohách o časové koordinaci spojů v uzlech, aplikuji lineární programování, a použiju základní pravidla pro sestavování lineárních modelů, bez kterých bychom nedokázali dosáhnout optimalizačních výsledků. Tímto způsobem dokážeme řešit modelové situace vyplývající ze zadaných úloh.

Je stanovené, že při existenci dostatečného času a existence výkonného výpočetního systému dokážeme řešit univerzální metody a přitom dosáhnou s vysokou pravděpodobností optimálních řešení v systému veřejné hromadné dopravy.

Řešením výše definovaných problému lze použít kombinaci dvou typů lineárního programování. Modely zabývající se řešením časové koordinace spojů v uzlech dopravní sítě a modely řešící problémy oběhů vozidel v dopravní síti.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI KOORDINAČNÍCH ÚLOH

Předchozí kapitola pojednávala o obecných situacích, které mohou nastat při řešení časových koordinaci v přestupních uzlech. Musíme proto nalézt další prohloubení řešených modelových situací s cílem posunout aplikované poznatky, které byly v minulosti dosažené.

První optimalizační metody se datují od 80.-tých let 20. století, vznikaly v tehdejším Výzkumném ústavu dopravy v Žilině. Jednotlivé optimalizační metody jsou podrobně představené v publikaci Základy matematickej teórie dopravy. [2] Další teoretický posun ve vývoji optimalizačních metod pro koordinační účely uskutečnil prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., z Fakulty řízení a informatiky Žilinské univerzity v Žilině, který v roce 2007 zformuloval výkonný lineární model určený pro koordinaci spojů v izolovaném přestupním uzlu. Na jím zkonstruovaný základní model bylo v minulosti navazováno v celé řadě závěrečných prací vytvořených na Institutu dopravy. Model byl rozvíjen za účelem jeho adaptability ve větším množství různých typů koordinačních úloh od izolovaných uzlů až po koordinaci síťovou.

Jedna z posledních závěrečných prací věnovaná časové koordinaci na bázi lineárního programování je práce s názvem „*Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava*“ [4], obhájená na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB-TU v Ostravě v roce 2014. Ve výše zmíněné diplomové práci [4], řešitel řeší jednosměrnou i obousměrnou koordinaci ve více přestupních uzlech současně. Řešitel vytvářel model s myšlenkou pro minimalizaci celkové časové ztráty všech přestupujících cestujících, v uzlech dopravní sítě. Jedním z výsledků navrhovaného modelu v diplomové práci však bylo, že se v přestupních uzlech shlukovalo větší množství přepravních vozidel, než bylo možné. Tímto způsobem nebyly při řešení zohledněny parametry přestupních uzlů dopravní sítě.

V této diplomové práci bude nedostatek práce [4] odstraněn, tzn., že časová koordinace bude prováděna při dodržení podmínky omezené kapacity v přestupních uzlech dopravní sítě. Protože bude navazováno na výsledky práce [4], bude v podstatě navazováno i na původní model prof. Janáčka.

3.1 PRAKTICKÉ ÚVODNÍ POZNATKY K TVORBĚ LINEÁRNÍCH MATEMATICKÝCH MODELŮ

V rámci návrhu lineárních matematických modelů je důležité se obeznámit se zásadními pravidly pro tvorbu lineárních modelů. Při tvorbě matematických modelů je prvním důležitým krokem správná formulace problému.

Formulace problému musí obsahovat:

1. známé údaje (konstanty – vstupní data),
2. požadované typy rozhodnutí (proměnné),
3. optimalizačním kritérium (OK).

Úkolem OK je porovnávat jednotlivá přípustná řešení a stanovit, které z nich je lepší nebo zda jsou obě (nebo více) řešení stejně kvalitní. Optimální řešení je nejlepší dosažitelné řešení za daných vstupních podmínek.

Jak již bylo uvedeno, vyskytují se v matematickém modelu dva typy veličin. První skupinu veličin tvoří konstanty, jejichž hodnoty jsou stanovené před začátkem řešení a v průběhu řešení modelu se nemění. Druhou skupinou veličin jsou proměnné, jejichž hodnoty nejsou stanoveny před začátkem řešení a očekáváme, že se v průběhu řešení budou měnit. Proměnné modelují rozhodnutí, která budou při zavádění výsledků optimalizace do praxe realizována.

V matematickém modelu se může vyskytovat více proměnných, jejichž počet je závislý na počtu rozhodnutí, které budeme provádět v řešených úlohách. V lineárním programování (LP) musí mít každá proměna stanoven typ definičního oboru.

Proměnné v lineárním programování mohou mít některý ze tří definičních oborů:

- množina nezáporných čísel,
- množina celých nezáporných čísel,
- množina hodnoty {0,1} – bivalentní proměnná.

Volba definičního oboru je závislá na rozhodnutí, které se očekává. Při zavádění bivalentní proměnné do úlohy se zpravidla uplatňuje užívaná konvence a to, že pozitivní rozhodnutí je modelováno hodnotou 1, negativní rozhodnutí hodnotou 0 [1]. Kupříkladu, když použijeme množinu celých nezáporných čísel vyjadřující počet přestupujících cestujících je tato volba správná. Jeden z příkladů pro použití bivalentní proměnné je vznik přestupní vazby mezi přijíždějícím spojem a odjíždějícím spojem v daném uzlu dopravní sítě. Proměnné v lineárním programování mohou nést libovolná označení.

Doporučuje se ale volit takový typ označení, ze kterého bude lehce identifikovatelné, jaké rozhodnutí má být provedeno.

V lineárním programování lze s výrazy obsahujícími proměnné provádět pouze následující tři typy povolených matematických operací:

- sčítání,
- odčítání,
- násobení reálnou konstantou.

Povolenými relačními znaménky uplatnitelnými v soustavě omezujících podmínek jsou znaménka $\leq, \geq$ a $=$.

Každý lineární model (LM) se skládá ze dvou základních částí:

- účelové funkce → udává hodnotu přípustného řešení a zároveň udává informaci o typu extrému, který hledáme, ať už se jedná o (maximalizaci nebo minimalizaci hodnoty), který se stává optimem,
- soustavy omezujících podmínek → vymezují množinu přípustných řešení, přičemž přípustné řešení je každé řešení vyhovující soustavě omezujících podmínek.

Omezující podmínky mohou být dvojího charakteru:

1. podmínky reprezentující reálná omezení,
2. podmínky vytvářející logické vazby mezi proměnnými modelujícími jednotlivá rozhodnutí (vazební podmínky).

Důležitým aspektem, který je nutno při sestavě matematických modelů brát na zřetel, je velikost sestavovaného modelu. Velikostí modelu máme na mysli počet použitých omezujících podmínek a počet použitých proměnných. Obecně zpravidla platí, že čím menší je rozsáhlost modelu, tím méně se může očekávat komplikací při jeho řešení. Při rozsáhlejších modelech je důležitá efektivita a doba, která je potřebná pro vyřešení modelu.

3.2 ZÁKLADNÍ MODEL PRO ČASOVOU KOORDINACI SPOJŮ V UZLECH DOPRAVNÍ SÍTĚ

Jak již bylo uvedeno výše v textu, bude navazováno na původní model z roku 2007, který sestavil prof. Janáček z Žilinské univerzity v Žilině.

Formulace problému

V dopravní síti je definována množina přijíždějících spojů I a množina odjíždějících spojů J. Pro každý přijíždějící spoj $i \in I$ je určen stanovený čas jeho příjezdu do přestupního uzlu, pro každý odjíždějící spoj $j \in J$ je určen stanovený čas jeho odjezdu z přestupního uzlu. Pro každý přijíždějící spoj $i \in I$ a odjíždějící spoj $j \in J$ jsou definovány nezáporné intervaly, ve kterých je dovoleno s těmito spoji posouvat v čase. K dispozici jsou dále informace vztažené k přijíždějícím spojům $i \in I$ a týkající se intenzita cestujících f_i, kteří budou v přestupním uzlu z těchto spojů přestupovat. Dále je k dispozici informace o přestupní době t_{prest} mezi přijíždějícími a odjíždějícími spoji. Přestupní doba je doba potřebná pro výstup, přesun, nástup a odbavení přestupujících cestujících. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých přijíždějících a odjíždějících spojů v časových intervalech tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta všech přestupujících cestujících. [1]

Před sestavením vlastního modelu musí být zřejmé, že v lineárním programování nemohou být použity definiční obory proměnných obsahující záporná čísla, v našem případě však uvedený případ (záporný posun vztažmo k aktuální časové poloze) může nastat. To je v případě, že lze se spoji posouvat v obou směrech. Je tedy nutné provést úpravu vstupních dat ze strany řešitele a to v tom smyslu, že všechny spoje se přesunou do některé určené krajní časové polohy.

Postup úpravy lze vysvětlit jednoduchým příkladem. Předpokládejme pravidelný příjezd spoje 7:10 a se spojem lze posouvat v čase v rozmezí ± 3 minuty vztažmo k aktuální poloze, to znamená v časovém intervalu 7:07 až 7:13. Dojde-li k přesunu spoje do nejdříve možné časové polohy, potom se spoj před začátkem procesu optimalizace bude nacházet v časové poloze 7:07 s maximálním možným časovým posunem +6 minut.

Další úpravou, která musí být provedena, je transformace časových údajů do vhodné formy. Protože optimalizační software Xpress-IVE, ve kterém budou výpočty prováděny, nepracuje s běžnou formou časových údajů (jak jsou udávány v jízdních řádech), zvolí se vhodně určitá časová poloha (základní) a skutečná časová poloha spoje se přepočítá od tohoto časového okamžiku v nezáporném směru v počtu vhodně zvolených elementárních časových jednotek. Je-li základní časovou polohou čas 7:00 (čas 0) a elementární časovou jednotkou je 1 minuta, potom spoj přijíždějící v čase 7:07 bude mít časovou polohu 7.

Nyní bude definováno označení veličin vystupujících v modelu:

tp_i…čas nejdříve možného příjezdu spoje $i \in I$ do přestupního uzlu,

to_j…čas nejdříve možného odjezdu spoje $j \in J$ z přestupního uzlu,

f_i…intenzita cestujících, kteří budou v přestupním uzlu ze spoje $i \in I$ přestupovat,

a_i…maximální dovolený časový posun přijíždějícího spoje $i \in I$,

b_j…maximální dovolený časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$,

t_{prest}…přestupní doba,

x_i…časový posun přijíždějícího spoje $i \in I$ (vztaženo k času nejdříve možného příjezdu),

y_j…časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ (vztaženo k času nejdříve možného odjezdu),

h_i…čekání cestujícího, který do přestupního uzlu přijel spojem $i \in I$ a bude čekat na navazující spoj,

z_{ij}…proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi přijíždějícím spojem $i \in I$ a odjíždějícím spojem $j \in J$.

Základní model pro časovou koordinaci spojů vypadá následovně:

$$min\, f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i \qquad (3.2.1)$$

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i) - t_{prest} \geq T(z_{ij} - 1) \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \qquad (3.2.2)$$

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i) - t_{prest} \leq h_i + T(1 - z_{ij}) \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \qquad (3.2.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \qquad (3.2.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \qquad (3.2.5)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \qquad (3.2.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \qquad (3.2.7)$$

$$y_j \geq 0 \quad \text{pro } j \in J \qquad (3.2.8)$$

$$h_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \qquad (3.2.9)$$

$$z_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \qquad (3.2.10)$$

Výraz (3.2.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Skupiny omezujících podmínek (3.2.2) a (3.2.3) jsou tzv. podmínky typu „buď anebo“. Skupina omezujících podmínek (3.2.2) zajistí, že nastane-li okamžik příchodu cestujících na stanoviště odjíždějícího spoje po odjezdu tohoto spoje, přestupní vazba nevzniká (je-li přestup časově přípustný, není daná podmínka aktivní). Skupina omezujících podmínek (3.2.3) zajistí vazbu soustavy omezujících podmínek na účelovou funkci modelu. Skupina podmínek (3.2.4) zajistí, že z každého přijíždějícího spoje bude vytvořena přestupní vazba na právě jeden odjíždějící spoj. Skupiny omezujících podmínek (3.2.5) a (3.2.6) zajistí, že při posunech spojů nebudou překročeny meze intervalů přípustných pro tyto posuny. Skupiny omezujících podmínek (3.2.7) – (3.2.10) reprezentují definiční obory proměnných. [1]

3.3 SOUČASNÉ POZNATKY V APLIKACI ČASOVÉ KOORDINACE SPOJŮ V DOPRAVNÍ SÍTI

Prvotní zápis modelu prof. Janáčka je základem pro tvorbu modelů pro náročnější úlohy dopravní praxe. V minulosti bylo řešeno na Institutu dopravy FS VŠB-TU Ostrava několik diplomových prací s obdobným tématem. Modelové situace řešené v těchto diplomových pracích shrnu v následujících odstavcích, neboť byly podnětem pro mou diplomovou práci.

Jedna z diplomových prací je od autora Ing. Winklera, který ve své práci [5], pojednává o problémech časové koordinaci spojů na úsecích dopravní sítě. Tato diplomová práce má dílčí varianty pro řešení úloh daných problému, které vyplývají z konkrétních situací. Řešitel věnoval pozornost jak jednosměrné časové koordinaci, tak i obousměrné časové koordinaci spojů. Pro časové koordinaci vytvořil šest možných variant modelů, které měly za úkol, přiblížit a zhodnotit řešený problém. Pro přehlednost bude uvedena tabulka, znázorňující možné varianty řešení matematických modelů.

Z hlediska výsledku pro časovou koordinaci na úsecích dopravní sítě pro zvolené území, řešitel docílil nejlepších výsledků s použitím matematického modelu, ve kterém bylo optimalizačním kritériem, rozdíl mezi maximální a minimální délkou intervalu mezi spoji s použitím kaskádového přístupu.

Označení řešeného modelu	Možnosti hodnot účelové funkce
Model č. 1	ÚF vyjadřující maximalizaci minimální délky intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji.
Model č. 2	ÚF vyjadřující minimalizaci maximální délky intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji.
Model č. 3	ÚF minimalizuje rozdíl mezi maximální a minimální délkou intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji.
Model č. 4	ÚF maximalizuje minimální délku intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji na bázi kaskádového přístupu.
Model č. 5	ÚF minimalizuje maximální délku intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji na bázi kaskádového přístupu.
Model č. 6	ÚF minimalizuje rozdíl mezi maximální a minimální délkou intervalu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji na bázi kaskádového přístupu.

Tabulka č. 1 Přehled optimalizačních kritérií podle sestavených modelů

Pro návrh matematického modelu časové koordinace spojů v dopravní síti musím také zmínit diplomovou práci zpracovanou Ing. Martiníkem, která řeší situaci časové koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava. Časová koordinace spojů byla simulována jak pro jednosměrné koordinace, tak i obousměrné časové koordinace spojů. Řešitel diplomové práce musel z hlediska funkčnosti nutně upravit model původního tvaru od prof. Janáčka. Řešitel stanovil matematický model pro dva přestupní uzly, které považoval z hlediska atraktivity za nejdůležitější. Byly zohledněny takty pro určení polohy spojů na časové ose, kde interval mezi spoji byl stanoven hodnotou 20 minut. Můžeme konstatovat, že byly použité 3 spoje na jednu linku v časových rozestupech (0,20,40). Řešitel neopomenul pravidlo časového posunu mezi jednotlivými spoji, které stanovuje maximální dovolenou hodnotu posunu spoje.

Pro názornost uvedu jeden z příkladu změn, které uplatnil autor Ing. Martiník ve své diplomové práci. [4] Jedna z prvních změn původního tvaru modelu, byla změna tvaru účelové funkce (ÚF).

Původní tvar byl znázorněný následovně:

$$min\, f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i$$

Původní hodnota účelové funkce (HÚF) vyjadřovala celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Změna HÚF, kterou provedl autor pro jednosměrnou koordinaci, byla modifikována následovně:

$$min\, f(x,h,z) = \sum_{i \in I} h_i$$

Věcný význam proměnné h_i byla záměrně změněn. Její původní význam měl modelovat skutečnou dobu čekání cestujícího, který přijel do přestupního uzlu. Řešitel pozměnil význam proměnné na možnost omezovat čekání všech cestujících, kteří přijeli daným spojem, shora.

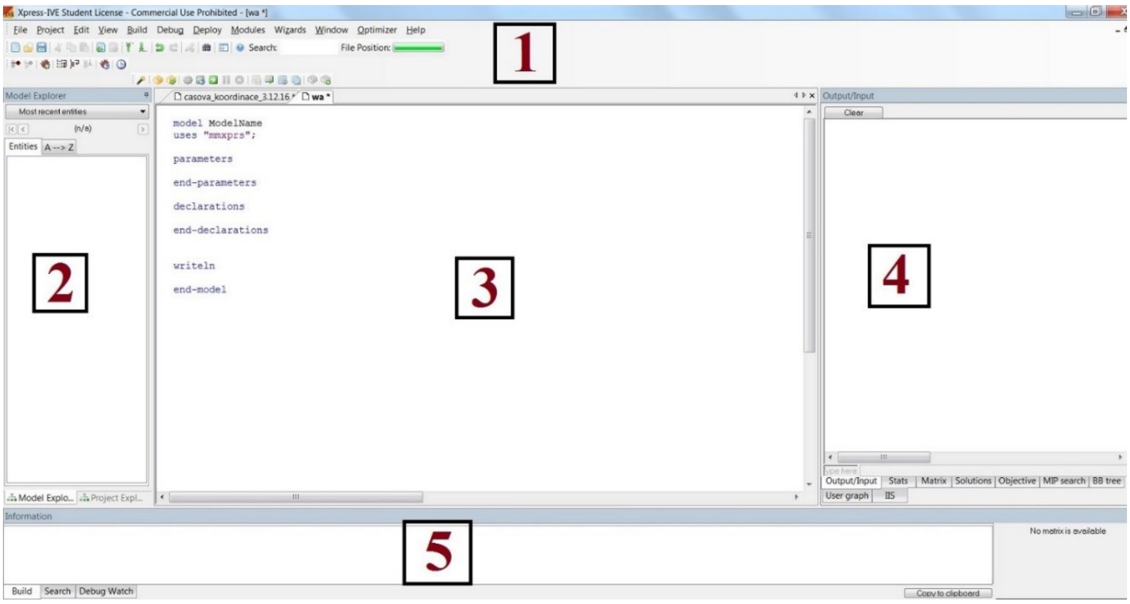
Poslední vzorovou diplomovou prací se zaměřením na problematiku časové koordinace spojů v dopravním systému, je diplomová práce [6], která řeší problém „Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska“, současně řeší problém koordinace oběhů vozidel na dopravní síti, jejímž autorem byla Ing. Lašáková. [6] Řešitelka navrhovala časovou koordinaci pro množinu vlakových spojů a taktéž množinu autobusových spojů. Úkolem této diplomové práce bylo rozhodnout o časových polohách autobusových spojů tak, aby k obsluze množiny autobusových spojů bylo zapotřebí co nejméně vozidel, a při přejezdech vozidel mezi spoji byla ujeta minimální neproduktivní vzdálenost při současné minimalizaci celkové doby čekání přestupujících cestujících z autobusových spojů na vlakové spoje v přestupních uzlech.

4 OPTIMALIZAČNÍ SOFTWARE XPRESS-IVE

Při sestavování matematicko-lineárních modelů a pro nalezení řešení optimálního výsledku ať už se jedná o maximum nebo minimum hodnoty hledaného optimalizačního kritéria, musí řešitel daného problému zvolit, jaký typ optimalizačního software pro řešení navrženého modelu použije. Vzhledem ke složitostem a komplikovanějším situacím, které se vyskytují v daném problému časové koordinace, např. vyplývajícím z požadavků na různé definiční obory proměnných a očekávaných rozsahů soustavy omezujících podmínek v reálných situacích, je zcela nemyslitelné tento model řešit ručně. Jedním z dostupných optimalizačních nástrojů pro nalezení hodnoty účelové funkce je optimalizační prostředí software Xpress-IVE od společnosti FICO. Tento software využívá programovacího jazyka MOSEL.

4.1 ZÁKLADNÍ UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ XPRESS-IVE

Pracovní plocha software může být rozdělena do dílčích částí. Řešitel do software vkládá text programu, který má předem stanovený tvar. Pro názornost budou popsány jednotlivé části oken, které jsou zobrazeny na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1 Grafické zobrazení uživatelského prostředí software Xpress-IVE

Z obrázku vyplývá, že pracovní plochu programu lze rozdělit do 5 základních částí.

V pozici s označením číslovkou 1 lze popsat jako lištu nástrojů. Tato část nám nabízí několik základních možnosti jak otevřít nový model současně s uložením atd. Uvedu zde zobrazení základních symbolů používaných v této liště nástrojů.

 „*New*“ – ikona umožňující vytvoření nového souboru s následným uložením do prostředí Windows,

 „*Save*“ – ikona umožňující průběžné ukládání souboru do definované složky,

 „*Undo*“ – ikona umožňující vrácení akce zpět,

 „*Compile*“ – ikona umožňující ověření správnosti textu v dílčí ploše s označením číslovkou 3, kde ověříme, jestli algoritmus nenašel v textu syntaktickou chybu. Jestliže je nalezena chyba, systém příslušný řádek podbarví žlutým pruhem v celém řádku. Tato chyba je podrobněji charakterizována v poziční části s označením číslovkou 5.

 „*Run model*“ – ikona umožňující zahájení optimalizačního výpočtu.

V dílčí ploše s označením číslovkou 2 software zobrazuje všechny zapsané veličiny, které vypisujeme k dílčí ploše s označením číslovkou 3, kde zapisujeme hlavní text textu programu.

Požadované výsledky z matematického modelu jsou prezentovány v dílčí ploše s označením číslovkou 4. V příslušném zobrazovacím okně pro výstupy má tato část několik záložek, ve kterých jsou zobrazeny informace o hledaných řešeních a o průběhu řešení.

4.2 ZÁKLADNÍ POPIS TEXTU MODELU V PROSTŘEDÍ XPRESS-IVE

Samotný řešitel zapisuje do programové části textovou část matematického modelu v předepsaném tvaru. Zápis se provádí pomocí znaků matematických operátorů, které lze používat v textových editorech. Pro zapsání a vyjádření funkcí vystupujících v modelu je prováděno na základě systému klíčových slov, které budou tyto funkce prezentovat.
Postup při zapsání modelu do jazyka MOSEL má několik základních kroku:

1) Deklarace veličin – identifikace všech veličin typu pole, deklarace seznamu indexů.
2) Zápis omezujících (strukturální) podmínek, které stanovují množinou přípustných řešení.

3) Zápis obligatorních podmínek, které stanovují definiční obory proměnných.
4) Stanovení hodnoty účelové funkce.
5) Zápis příkazu hodnoty účelové funkce s možností buď funkci minimalizovat, nebo maximalizovat.
6) Zápis vypsání výsledku v části pro výstup z matematického modelu.

Před zahájením deklarační části modelu je nutné vytvořit název modelu, který zapisujeme v úvodní části např. ve tvaru

```
model casova_koordinace_spoju
uses "mmxprs"
```

Pokračováním v tvorbě matematického modelu je tvorba deklarační části. Deklarační část musí být zahájena klíčovým slovem „*declarations*“, která obsahuje deklaraci veličin a které budou v matematickém modelu vystupovat, a které je zapotřebí je deklarovat. V deklarační části se zapisují všechny konstanty typu pole a všechny proměnné.

Typy vystupujících veličin a jejich klíčová slova

- real – reálné číslo
- mpvar – proměnná

Příklad deklarační části textu programu:

```
declarations
m=2
n=3

prijspoj=1..m
odjspoj=1..n

tp:array(prijspoj)of real
tod:array(odjspoj)of real
f:array(prijspoj)of real
a:array(prijspoj)of real
b:array(odjspoj)of real
x:array(prijspoj)of mpvar
y:array(odjspoj)of mpvar
h:array(prijspoj)of mpvar
z:array(prijspoj,odjspoj)of mpvar

end-declarations
```

Každá deklarační část je ukončena klíčovým slovem „end-declarations“.

Textová část programu pokračuje ve vlastním definování konkrétních hodnot konstant, zapíší se omezující podmínky a definuje se účelové funkce včetně požadavku na typ extrému (minimalizace, maximalizace). Pro ukázku uvedu příklad textové části obsahující tělo programu.

```
tp::[30,140]
tod::[25,85,145]
f::[25,16]
a::[20,20]
b::[10,10,10]
T:=1000

forall(i in prijspoj)x(i)<=a(i)
forall(j in odjspoj)y(j)<=b(j)
forall(i in prijspoj)sum(j in odjspoj)z(i,j)=1
forall(i in prijspoj)x(i)>=0
forall(j in odjspoj)y(j)>=0
forall(i in prijspoj)h(i)>=0
forall(i in prijspoj,j in odjspoj)z(i,j)is_binary
forall(i in prijspoj,j in odjspoj)tod(j)+y(j)-tp(i)-x(i)>=T*(z(i,j)-1)
forall(i in prijspoj,j in odjspoj)tod(j)+y(j)-tp(i)-x(i)<=h(i)+T*(1-z(i,j))

HUF:=sum(i in prijspoj)f(i)*h(i)
minimize(HUF)
```

Z textu programu lze vyčíst, že v modelu budou v řešeném dopravním uzlu koordinovány 2 přijíždějící spoje se 3 odjíždějícími spoji. Také je uvedená intenzita přestupujících cestujících (f) a maximálně dovolený časový posun přijíždějících a odjíždějících spojů (a, b). Hodnota účelové funkce bude minimalizována, jelikož se jedná o celkovou časovou ztrátu všech přestupujících. Jestliže potřebujeme zjistit hodnotu účelové funkce, existuje proto zápis, který umožní zobrazit její hodnotu. Požadovaný výpis definujeme zápisem textu (writeln). Řešitel má možnost výpisu hodnot proměnných vystupujících v modelu. Zápis pro zobrazení hodnoty účelové funkce zapíšeme ve tvaru (getobjval) a pro výpis výsledných hodnot proměnných zapíšeme text ve tvaru (getsol). Část textu programu obsahující požadavek na výpis hodnot účelové funkce a proměnných, kterých bylo dosaženo v průběhu optimalizačního výpočtu, může mít tvar:

```
writeln("Celkova casova ztrata vsech prestupujicich je:",getobjval,"min")
    forall(i in prijspoj)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))
    forall(j in odjspoj)writeln("y(",j,")=",getsol(y(j)))
    forall(i in prijspoj,j in odjspoj|getsol(z(i,j))>0)
    writeln("z(",i,",",j,")=",getsol(z(i,j)))
```

Řešitel má možnost v celkovém textu programu Xpress-IVE vložit libovolný typ komentáře. Jelikož algoritmus programu pracuje s přesným typem zápisu textu, vyhodnotil by vložený komentář jako syntaktickou chybu. Pro tento účel vkládaní libovolného textu musíme vložit před komentář symbol (!), ilustrován např. ve tvaru:

```
!Podmínky reprezentující definiční obory proměnných
forall(i in prijspoj)x(i)>=0
forall(j in odjspoj)y(j)>=0
forall(i in prijspoj)h(i)>=0
```

5 NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU

V této kapitole bude popsán návrh úpravy matematického modelu prof. Janáčka, který bude koordinovat spoje v přestupních uzlech s omezenou kapacitou.

Hlavní úprava existujícího modelu bude v soustavě omezujících podmínek. Aby bylo možno zajistit, že v každé časové poloze se bude nacházet v přestupním uzlu maximální možný počet vozidel označený dále v textu symbolem MAX, je zapotřebí vytvořit příslušnou omezující podmínku. Za tím účelem bude do úlohy zavedena množina časových poloh odpovídající minutovým hodnotám v rámci řešeného období. Dále musí být charakterizovány situace, ve kterých bude koordinace prováděna. Předpokládá se takový provoz na všech koordinovaných linkách s hodnotou taktu 20 minut.

Pro zjednodušení bude v publikované variantě uvažováno s jedním přijíždějícím spojem na každé lince, ze kterého budou cestující přestupovat. Protože v případě počtu koordinovaných linek většího než je hodnota MAX je zřejmé, že existuje-li požadavek cestujících přestupovat mezi spoji všech linek, není možné zabezpečit přestupy mezi spoji všech linek v rámci jednoho taktu. Aby bylo možno požadovat vznik přestupní vazby ze kteréhokoliv spoje přijíždějícího do přestupního uzlu právě na jeden odjíždějící spoj (což je základní filozofie pro uvedení původního modelu do funkčního stavu), budou muset být do koordinační úlohy zahrnuty pro odjíždějící spoje časové polohy i taktu následujícího. Z tohoto důvodu budou v modelu figurovat dvě množiny časových poloh P_1 a P_2, kde množina časových poloh P_1 reprezentuje množinu časových poloh pro přijíždějící spoje a množina časových poloh P_2 reprezentuje množinu časových poloh pro odjíždějící spoje. Množina časových poloh pro přijíždějící spoje bude obsahovat 20 prvků (časové polohy 0 … 19), množina časových poloh pro odjíždějící spoje bude obsahovat 40 prvků (časové polohy 0 … 39). Nad rámec původního modelu, ve kterém figuruje pouze množina přijíždějících a množina odjíždějících spojů, bude v navržené modifikaci zavedena i množina linek označená symbolem L. Množiny spojů jednotlivých linek označené J budou dvouprvkové, přičemž přestupováno bude vždy pouze z prvního spoje. Druhý spoj je do modelu zaveden pro případy, že prvnímu spoji linky, na který se má přestoupit, bude přidělena časová poloha předcházející prvnímu spoji linky, ze které se má přestoupit (první spoj linky odjíždí před příjezdem prvního spoje linky jiné).

Dále bude původní model upraven následovně:

Do úlohy bude zavedena bivalentní proměnná y_{ijp} umožňující přiřadit spoj $j \in J$ linky $i \in L$ časové poloze $p \in P_2$ (množina P_2 je zvolena nutnosti přidělit časovým polohám oba spoje všech linek). Když po ukončení optimalizačního výpočtu bude platit $y_{ijp} = 1$, potom spoj $j \in J$ linky $i \in L$ bude přidělen časové poloze $p \in P_2$, když $y_{ijp} = 0$, potom spoj $j \in J$ linky $i \in L$ časové poloze $p \in P_2$ přidělen nebude.

Protože spoje všech linek jezdí v taktu 20 minut, musí pro druhý spoj každé linky $i \in L$ platit:

$$t_{i2} = t_{i1} + 20$$

V původním modelu navrženém prof. Janáčkem vystupovala proměnná h_i reprezentující čekání cestujícího z přijíždějícího spoje $i \in I$, kde symbolem I byla v původním modelu označena množina přijíždějících spojů. Protože v modifikovaném modelu musí být rozlišeno, z jakých linek a na jaké linky cestující přestupují, musí tento požadavek projevit i v použité proměnné. Za tím účelem zavedeme do úlohy skupinu proměnných h_{i1k}, přičemž daná proměnná modeluje dobu čekání cestujícího přestupujícího z prvního spoje (druhý index) linky $i \in L$ na linku $k \in L$, kde $k \neq i$.

V původním modelu navrženém prof. Janáčkem dále vystupovala bivalentní proměnná z_{ij} reprezentující vznik přestupní vazby z přijíždějícího spoje $i \in I$ na odjíždějící spoj $j \in J$, kde symbolem I byla v původním modelu označena množina přijíždějících spojů a symbolem J byla v původním modelu označena množina odjíždějících spojů. Protože v modifikovaném modelu musí být rozlišeno, z jakých linek a na jaké linky cestující přestupují a dále, na který z odjíždějících spojů bude zajištěna přestupní vazba, bude proměnná označena symbolem z_{i1kl}. Když po ukončení optimalizačního výpočtu bude platit, že $z_{i1kl} = 1$, bude to znamenat, že vznikne přestupní vazba ze spoje 1 linky $i \in I$ na spoj $l \in J$ linky $k \in L$, kde $k \neq i$. Když po ukončení optimalizačního výpočtu bude platit, že $z_{i1kl} = 0$, bude to znamenat, že ze spoje 1 linky $i \in I$ na spoj $l \in J$ linky $k \in L$, kde $k \neq i$ přestupní vazba nevznikne.

Matematický model má následující tvar:

$$min\, f(y,h,z) = \sum_{i \in L} \sum_{k \in L} f_{ik} \cdot h_{i1k} \tag{5.1}$$

za podmínek:

$$t_{kl} + \sum_{p \in P_2} p \cdot y_{klp} - \left[t_{i1} + \sum_{p \in P_1} p \cdot y_{i1p} + t_{prest} \right] \geq T \cdot (z_{i1kl} - 1) \tag{5.2}$$

pro $i \in L,\ \ k \in L,\ k \neq i,\ l \in J$

$$t_{kl} + \sum_{p \in P_2} p \cdot y_{klp} - \left[t_{i1} + \sum_{p \in P_1} p \cdot y_{i1p} + t_{prest} \right] \leq h_{i1k} + T \cdot (1 - z_{i1kl}) \tag{5.3}$$

pro $i \in L,\ \ k \in L,\ k \neq i,\ l \in J$

$$\sum_{l \in J} z_{i1kl} = 1 \tag{5.4}$$

pro $i \in L,\ \ k \in L,\ k \neq i$

$$\sum_{i \in L} \sum_{j \in J} y_{ijp} \leq MAX \tag{5.5}$$

pro $p \in P_2$

$$\sum_{p \in P_2} y_{ijp} = 1 \tag{5.6}$$

pro $i \in L,\ \ j \in J$

$$\sum_{p \in P_1} p \cdot y_{i1p} + 20 = \sum_{p \in P_2} p \cdot y_{i2p} \tag{5.7}$$

pro $i \in L$

$$z_{i1kl} \in \{0; 1\} \tag{5.8}$$

pro $i \in L,\ k \in L,\ k \neq i,\ j \in J$

$$y_{ijp} \in \{0; 1\} \tag{5.9}$$

pro $i \in L,\ j \in J,\ p \in P_2$

$$h_{i1k} \geq 0 \tag{5.10}$$

pro $i \in L,\ k \in L,\ k \neq i$

Funkce (5.1) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou časovou ztrátu cestujících vyjádřenou v osobominutách, kteří přestupují z prvních spojů všech koordinovaných linek.

Skupina omezujících podmínek (5.2) zabezpečí, že ke spoji linky (na který se přestupuje), jehož odjezd z přestupního uzlu nastane dříve, než příjezd spoje linky (ze kterého se přestupuje), potom přestupní vazba mezi těmito spoji nevznikne. Skupina omezujících podmínek (5.3), která kooperuje se skupinou omezujících podmínek (5.4) vypočítá skutečnou časovou ztrátu přestupujících cestujících. Skupina omezujících podmínek (5.4) zajistí, že z každého prvního spoje všech linek vznikne přestupní vazba buď na první, nebo na druhý spoj všech ostatních linek. Skupina omezujících podmínek (5.5) zajistí, že v jedné časové poloze nedojde ke shluku více vozidel v přestupním uzlu, než je povolená maximální hodnota. Skupina omezujících podmínek (5.6) zajistí, že každý spoj každé linky bude umístěn právě do jedné časové polohy. Skupina omezujících podmínek (5.7) zajistí, že stejné časové posuny, které byly uplatněny na první spoje všech linek, budou také uplatněny na druhé spoje všech linek. Skupiny omezujících podmínek (5.8) – (5.10) vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

6 VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY S NAVRŽENÝM MODELEM

V kapitole 5 byl uveden návrh modelu pro řešení matematického modelu časové koordinace s omezenou kapacitou v přestupních uzlech. Obsahem této kapitoly budou výpočetní experimenty s navrženým modelem, které budou realizovány v optimalizačním software Xpress-IVE.

Funkčnost navrženého modelu bude testována na modelovém příkladu.

Formulace problému

Je dán přestupní uzel, ve kterém se sjíždějí spoje tří linek. Na všech linkách je uplatněn stejný takt mezi spoji, který činí 20 minut. Do přestupního uzlu tedy budou na každé lince přijíždět dva spoje, přičemž z prvního z nich se bude přestupovat. Přestupní doba mezi spoji bude nastavena na hodnotě 0. V modelových příkladech je to možné, v reálných úlohách je nulová přestupní doba z pochopitelných důvodů neakceptovatelná.

Intenzity cestujících přestupujících z prvních spojů na spoje jiných linek jsou uvedeny v následující tabulce č. 2:

	Linka 1	Linka 2	Linka 3
Linka 1	x	100	1
Linka 2	5	x	1
Linka 3	0	1	x

Tabulka č. 2 Intenzity přestupujících cestujících

Je známa kapacita přestupního uzlu, která definuje maximální počet vozidel, která se mohou v uzlu nacházet ve stejné minutě. Tato hodnota bude v průběhu výpočetních experimentů zvyšována postupně z minimální hodnoty 1 na hodnotu 3.

Z hlediska očekávaného vývoje hodnoty účelové funkce se předpokládá, že se zvyšující se kapacitou přestupního uzlu se bude snižovat časová ztráta přestupujících cestujících, protože zvyšující se kapacita přestupního uzlu přinese možnost zvýšení počtu vozidel, které se mohou současně nacházet v přestupním uzlu, a bude tedy možné přestupovat současně mezi větším počtem spojů.

Text programu pro optimalizační software Xpress-IVE má tvar (je to případ, ve kterém má kapacita přestupního uzlu hodnotu MAXIMUM = 1):

```
model Casova_koordinace
uses "mmxprs"

declarations
linka=1..3
spoj=1..2
poloha=0..39
f:array(linka,linka)of real
t:array(linka,spoj)of real
y:array(linka,spoj,poloha)of mpvar
z:array(linka,1..1,linka,spoj)of mpvar
h:array(linka,spoj,linka)of mpvar
end-declarations
MAXIMUM:=1
tprest:=0

f::[0,100,1,
   5,0,1,
   0,1,0]

forall(i in linka)t(i,1):=0
forall(i in linka)t(i,2):=t(i,1)+20

forall(i in linka,j in 1..1,k in linka,l in 1..2)t(k,l)+sum(p in poloha)p*y(k,j,p)-
(t(i,1)+sum(p in 0..19)p*y(i,1,p)+tprest)>=1000*(z(i,1,k,l)-1)
forall(i in linka,j in 1..1,k in linka,l in 1..2)t(k,l)+sum(p in poloha)p*y(k,j,p)-
(t(i,1)+sum(p in 0..19)p*y(i,1,p)+tprest)<=h(i,1,k)+1000*(1-z(i,1,k,l))
forall(i in linka,j in 1..1,k in linka|k<>i)sum(l in 1..2)z(i,1,k,l)=1
forall(i in linka,j in 1..1,k in linka,l in 1..2)z(i,1,k,l)is_binary
```

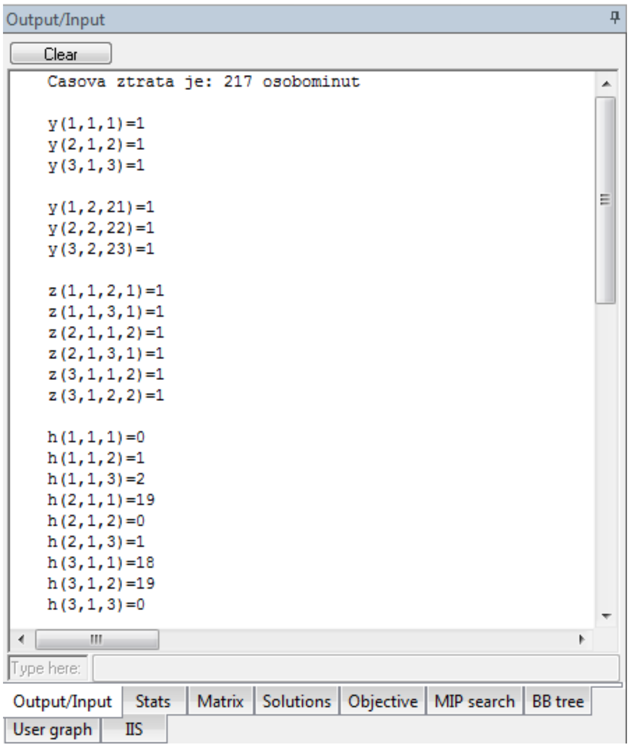
```
forall(i in linka,j in spoj,p in poloha)y(i,j,p)is_binary
forall(p in poloha)sum(i in linka,j in spoj)y(i,j,p)<=MAXIMUM
forall(i in linka,j in spoj)sum(p in poloha)y(i,j,p)=1
forall(i in linka)sum(p in 0..19)p*y(i,1,p)+20=sum(p in 0..39)p*y(i,2,p)

HUF:=sum(i in linka,k in linka)f(i,k)*h(i,1,k)
minimize(HUF)

writeln("Casova ztrata je: ",getobjval, " osobominut")
writeln
forall(i in linka,j in 1..1,p in poloha|getsol(y(i,1,p))>0)writeln("y(",i,",",j,",",p,")=",
getsol(y(i,1,p)))
writeln
forall(i in linka,j in 2..2,p in poloha|getsol(y(i,2,p))>0)writeln("y(",i,",",j,",",p,")=",
getsol(y(i,2,p)))
writeln
forall(i in linka,j in 1..1,k in linka,l in
spoj|getsol(z(i,j,k,l))>0)writeln("z(",i,",",j,",",k,",",l,")=", getsol(z(i,j,k,l)))
writeln
forall(i in linka,j in linka)writeln("h(",i,",",1,",",j,")=",getsol(h(i,1,j)))
writeln
forall(i in linka,j in linka)writeln("f(",i,",",j,")*h(",i,",",j,")=",getsol(f(i,j)*h(i,1,j)))
end-model
```

6.1 VÝPOČETNÍ EXPERIMENT Č. 1

Při tomto výpočetním experimentu byla kapacita přestupního uzlu nastavena na nejnižší hodnotě 1. To tedy znamená, že v přestupním uzlu se může v jedné časové poloze (minutě) v průběhu taktu nacházet maximálně 1 vozidlo. Z hlediska organizace přestupů je tato situace situací nejhorší. Pokud existuje alespoň jedna nenulová intenzita přestupujících cestujících, časová ztráta vznikne za všech okolností.

Z pohledu hodnoty účelové funkce lze při kapacitě přestupního uzlu 1 očekávat nejnepříznivější hodnotu časové ztráty.

Obrázek č. 2 znázorňuje fragment dílčí plochy 4 s uvedením hodnoty účelové funkce a vypočítaných hodnot proměnných (v případě skupin proměnných y_{ijp} a z_{i1kl} je účelné vypisovat pouze ty proměnné, které nabývají nenulových hodnot).



Obrázek č. 2 Fragment dílčí plochy 4 s uvedením výsledků optimalizačního výpočtu

Dle výpisu výsledků činí celková časová ztráta při této kapacitě přestupního uzlu 217 ztrátových osobominut.

Z hodnot uvedených na obrázku č. 2 je možno dovodit časové polohy spojů jednotlivých linek (polohu udává poslední index u proměnných y_{ijp}). Na základě zavedeného značení je možno dovodit, že spoje linky č. 1 budou vedeny v časových polohách 01 a 21, spoje linky č. 2 v časových polohách 02 a 22 a spoje linky č. 3 v časových polohách 03 a 23. Zařazení odjezdů spoje linky č. 2 do časové polohy +1 minuta za spoji linky č. 1 je logické. Ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 2 totiž přestupuje 100 cestujících (což je v porovnání s dalšími přestupními intenzitami enormně vysoké číslo).

Každá další minuta čekání těchto 100 cestujících by radikálně zvýšila hodnotu účelové funkce. Proto je spoj č. 1 linky č. 2 umístěn do nejbližší následující časové polohy vztažmo k časové poloze spoje č. 1 linky č. 1, ze které přestupuje oněch 100 cestujících.

Dále je možno (podle hodnot proměnných z_{i1kl} a h_{i1k}) dohledat, na které spoje linek č. 1, č. 2 a č. 3 se bude přestupovat ze spoje č. 1 těchto linek. Ze spoje č. 1 linky č. 1 a bude vytvořena přestupní vazba na spoj č. 1 linky č. 2 a na spoj č. 1 linky č. 3. Časová ztráta cestujících, kteří přestupují ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 2, bude 1 minuta, časová ztráta cestujících, kteří přestupují ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 3, budou 2 minuty. Celkově tedy vznikne při přestupech ze spoje č. 1 linky č. 1 časová ztráta 100 + 2 minuty = 102 ztrátové osobominuty. Hodnota 100 vznikla jako součin 100 přestupujících cestujících a 1 minuty, po kterou tito cestující čekají. Hodnota 2 vznikla jako součin 1 přestupujícího cestujícího a 2 minut, které tento cestující pročeká.

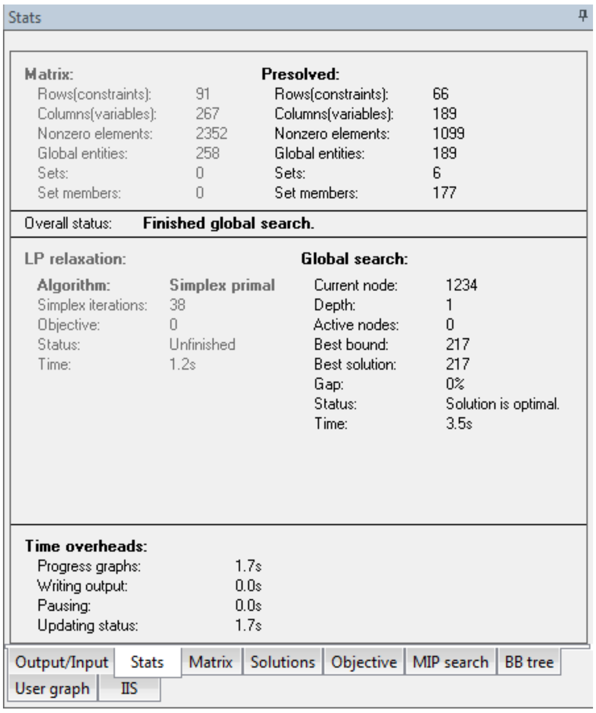
Analogicky bude postupováno v dalších případech.

5 cestujících přijíždějících do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 2 a přestupující na linku č. 1 bude čekat 19 minut a 1 cestující přestupující na linku č. 3 bude čekat 1 minutu. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 2 tedy vznikne časová ztráta 5·19 + 1·1 = 96 ztrátových osobominut.

1 cestující přijíždějící do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 3 a přestupující na linku č. 2 bude čekat 19 minut. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 3 tedy vznikne časová ztráta 1·19 = 19 ztrátových osobominut.

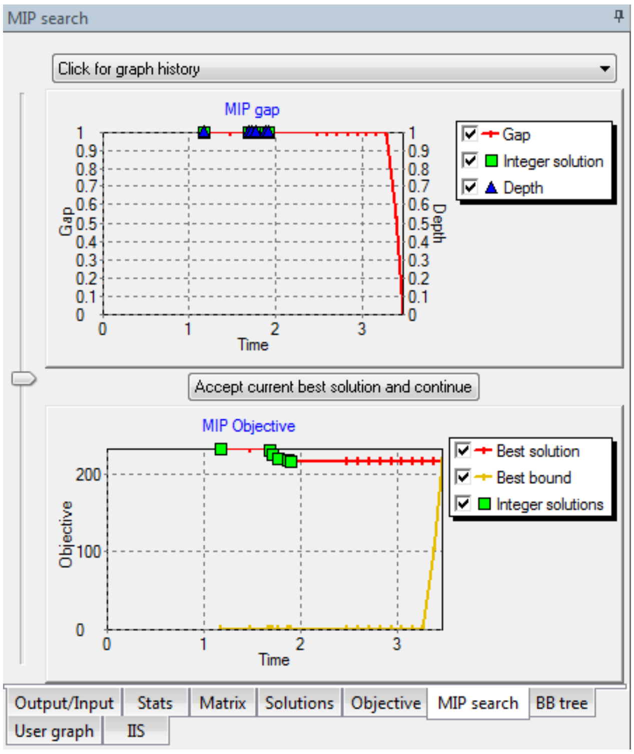
Sečteme-li všechny tři hodnoty časových ztrát vztahujících se ke všem linkám, dostáváme celkovou časovou ztrátu, která činí 102 + 96 + 19 = 217 ztrátových osobominut, což odpovídá hodnotě účelové funkce.

Na obrázku č. 3 je možno vidět stavové hlášení z optimalizačního software, které mimo jiné dokumentuje také nalezení optimálního řešení. Hlášení o nalezení optimality je možno najít v položce *Status*.



Obrázek č. 3 Stavové hlášení z optimalizačního software

Na obrázku č. 4 je vidět průběh optimalizačního výpočtu v čase.



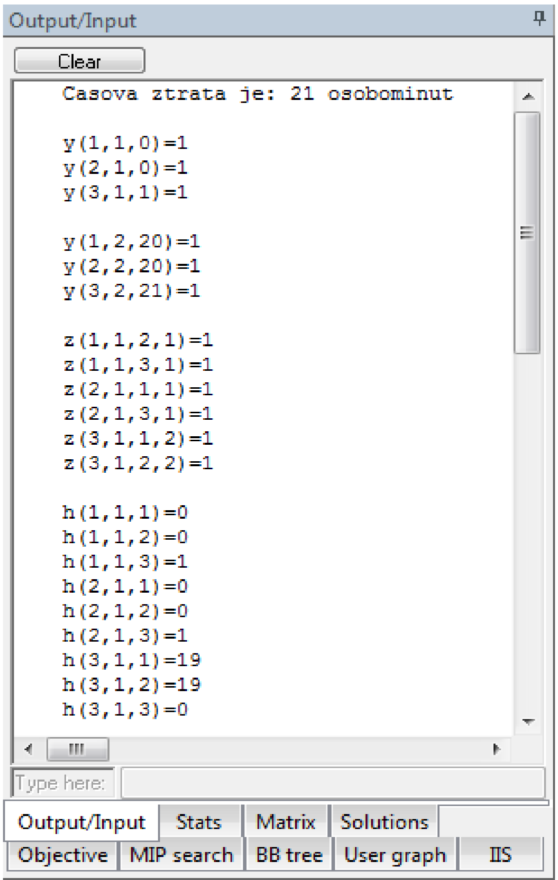
Obrázek č. 4 Průběh optimalizačního výpočtu v čase

Optimalizační výpočet trval 3,5 s, přičemž optimální řešení bylo nalezeno v čase 1,9 s od jeho zahájení.

6.2 VÝPOČETNÍ EXPERIMENT Č. 2

Při tomto výpočetním experimentu byla kapacita přestupního uzlu nastavena na hodnotě 2. To tedy znamená, že v přestupním uzlu se mohou v jedné časové poloze (minutě) v průběhu taktu nacházet maximálně 2 vozidla. Z hlediska organizace přestupů je tato situace situací lepší, než se vyskytla v předchozím experimentu. Dá se očekávat, že do stejné časové polohy budou umístěny spoje dvou linek, mezi kterými je nejsilnější intenzita přestupujících cestujících. Z pohledu vývoje hodnoty účelové funkce nelze při kapacitě přestupního uzlu 2 očekávat horší hodnotu časové ztráty, než tomu bylo v předchozím případě.

Obrázek č. 5 znázorňuje fragment dílčí plochy 4 s uvedením hodnoty účelové funkce a vypočítaných hodnot proměnných (analogicky jako v předchozím případu je v případě skupin proměnných y_{ijp} a z_{i1kl} účelné vypisovat pouze ty proměnné, které nabývají pouze nenulových hodnot).



Obrázek č. 5 Fragment dílčí plochy 4 s uvedením výsledků optimalizačního výpočtu

Dle výpisu výsledků činí celková časová ztráta při této kapacitě přestupního uzlu 21 ztrátových osobominut.

Z hodnot uvedených na obrázku č. 5 je možno opět dovodit časové polohy spojů jednotlivých linek (polohu udává opět poslední index u proměnných y_{ijp}). Na základě zavedeného značení je možno dovodit, že spoje linky č. 1 budou vedeny v časových polohách 00 a 20, spoje linky č. 2 také v časových polohách 00 a 20 a spoje linky č. 3 v časových polohách 01 a 21. Současné přidělení časových poloh 00 a 20 spojům linek č. 1 a č. 2 je logické. Ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 2 totiž přestupuje 100 cestujících a ze spoje č. 1 linky č. 2 na linku č. 1 přestupuje 5 cestujících. Čekání tedy vznikne pouze pro 1 cestujícího, který přijel do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 1 a přestupuje na linku č. 3, dále pro 1 cestujícího, který přijel do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 2 a přestupuje na linku č. 3 a 1 cestujícího, který přijel do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 3 a přestupuje na linku č. 2.

Dále je možno (opět podle hodnot proměnných z_{i1kl} a h_{i1k}) dohledat, mezi kterými spoji linek č. 1, č. 2 a č. 3 se bude přestupovat. Ze spoje č. 1 linky č. 1 a bude vytvořena přestupní vazba na spoj č. 1 linky č. 2 a na spoj č. 1 linky č. 3. Časová ztráta 100 cestujících, kteří přestupují ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 2, bude 0 minut, časová ztráta 1 cestujícího, který přestupuje ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 3, bude 1 minuta. Celkově tedy vznikne při přestupech ze spoje č. 1 linky č. 1 časová ztráta 1 ztrátová osobominuta.

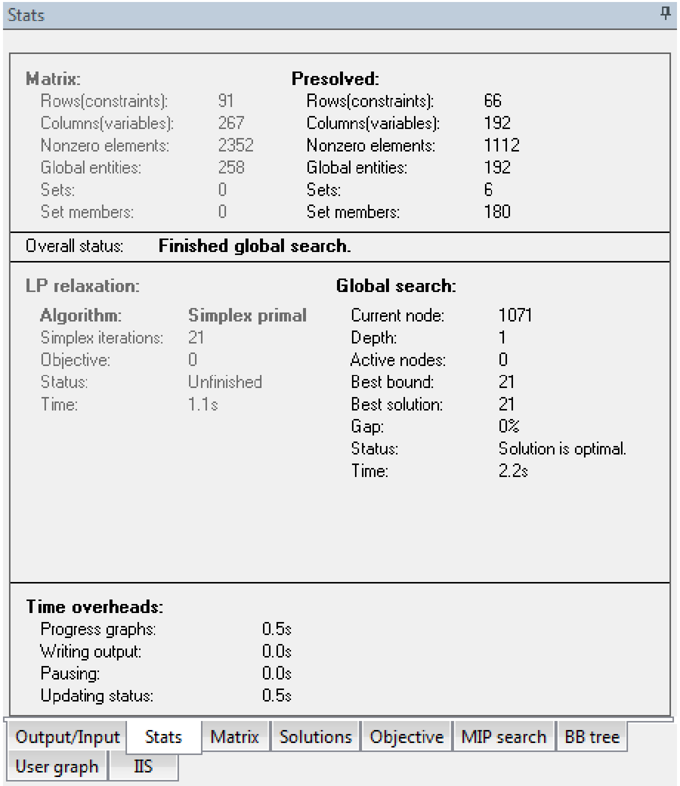
Analogicky bude postupováno v dalších případech.

5 cestujících přijíždějících do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 2 a přestupující na linku č. 1 nebude čekat, protože první spoje obou linek byly do stejné časové polohy. 1 cestující, který ze spoje č. 1 linky č. 2 přestupuje na linku č. 3, bude čekat 1 minutu. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 2 tedy vznikne časová ztráta 1 ztrátová osobominuta.

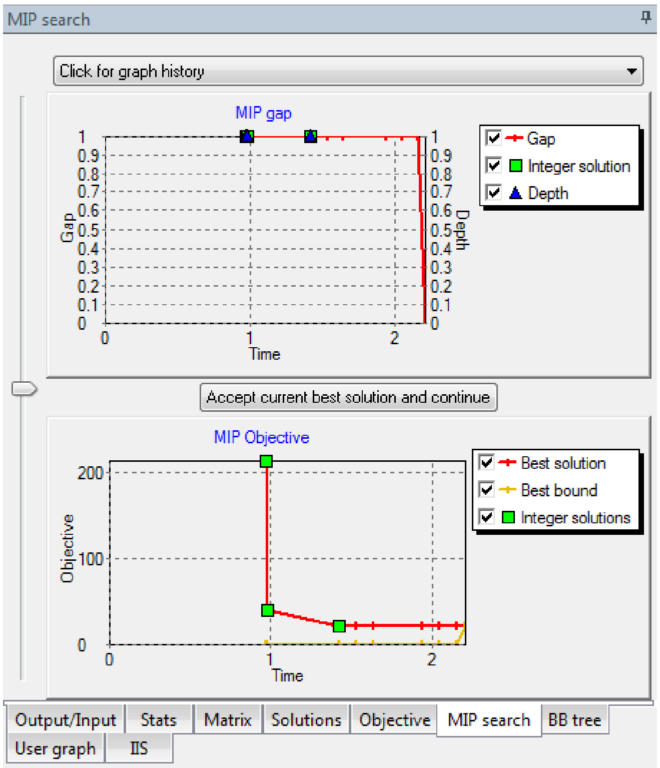
1 cestující přijíždějící do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 3 a přestupující na linku č. 2 bude čekat 19 minut. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 3 tedy vznikne časová ztráta $1 \cdot 19 = 19$ ztrátových osobominut.

Sečteme-li všechny tři hodnoty časových ztrát vztahujících se ke všem linkám, dostáváme celkovou časovou ztrátu, která činí $1 + 1 + 19 = 21$ ztrátových osobominut, což odpovídá hodnotě účelové funkce.

Na obrázku č. 6 je možno vidět stavové hlášení z optimalizačního software, které mimo jiné dokumentuje také nalezení optimálního řešení. Hlášení o nalezení optimality je možno najít v položce *Status*. Na obrázku č. 7 je vidět průběh optimalizačního výpočtu v čase.



Obrázek č. 6 Stavové hlášení z optimalizačního software



Obrázek č. 7 Průběh optimalizačního výpočtu v čase

Optimalizační výpočet trval 2,2 s, přičemž optimální řešení bylo nalezeno v čase 1,4 s od jeho zahájení.

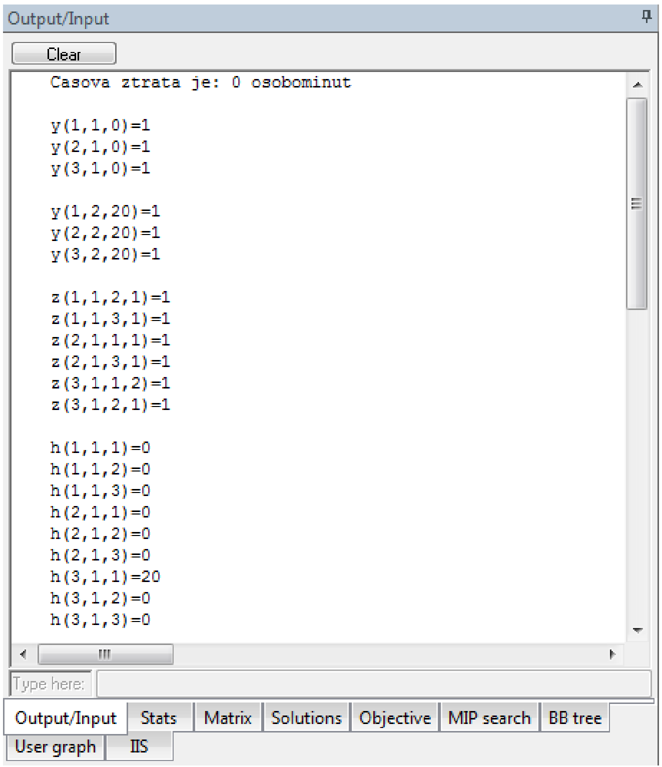
6.3 VÝPOČETNÍ EXPERIMENT Č. 3

Při tomto výpočetním experimentu byla kapacita přestupního uzlu nastavena na maximální hodnotě 3. To tedy znamená, že v přestupním uzlu se mohou v jedné časové poloze (minutě) v průběhu taktu nacházet maximálně 3 vozidla.

Z hlediska organizace přestupů je tato situace situací lepší, než se vyskytla v předchozím experimentu. Dá se očekávat, že do stejné časové polohy budou umístěny spoje dvou linek, mezi kterými je nejsilnější intenzita přestupujících cestujících. Z pohledu hodnoty účelové funkce nelze při kapacitě přestupního uzlu 3 očekávat horší hodnotu časové ztráty, než tomu bylo v předchozích případech.

Při koordinaci spojů třech linek v přestupním uzlu s kapacitou 3 vozidla se dá očekávat, že časová ztráta bude rovna 0. To je způsobeno tím, že je umožněno umístění všech tří spojů do stejné časové polohy. Analogická situace s nulovou časovou ztrátou vznikne vždy, když je kapacita přestupního uzlu vyšší, než je počet linek, jejichž spoje mají být koordinovány.

Obrázek č. 8 znázorňuje fragment dílčí plochy 4 s uvedením hodnoty účelové funkce a vypočítaných hodnot proměnných (analogicky jako v předchozím případu je v případě skupin proměnných y_{ijp} a z_{i1kl} účelné vypisovat pouze ty proměnné, které nabývají pouze nenulových hodnot).



Obrázek č. 8 Fragment dílčí plochy 4 s uvedením výsledků optimalizačního výpočtu

Dle výpisu výsledků činí celková časová ztráta při této kapacitě přestupního uzlu očekávaných 0 ztrátových osobominut.

Z hodnot uvedených na obrázku č. 8 je možno opět dovodit časové polohy spojů jednotlivých linek (polohu opět udává poslední index u proměnných y_{ijp}). Na základě zavedeného značení je možno dovodit, že spoje všech linek budou vedeny v časových polohách 00 a 20.

Dále je možno (podle hodnot proměnných z_{i1kl} a h_{i1k}) dohledat, na které spoje linek č. 1, č. 2 a č. 3 se bude přestupovat ze spoje č. 1 těchto linek. Ze spoje č. 1 linky č. 1 a bude vytvořena přestupní vazba na spoj č. 1 linky č. 2 a na spoj č. 1 linky č. 3. Časová ztráta cestujících, kteří přestupují ze spoje č. 1 linky č. 1 na linku č. 2, bude 0 minut, totéž se týká časové ztráty cestujících přestupujících ze spoje linky č. 1 na spoj č. 1 linky č. 3. Celkově tedy vznikne při přestupech ze spoje č. 1 linky č. 1 časová ztráta 0 ztrátových osobominut.

Analogicky bude postupováno v dalších případech.

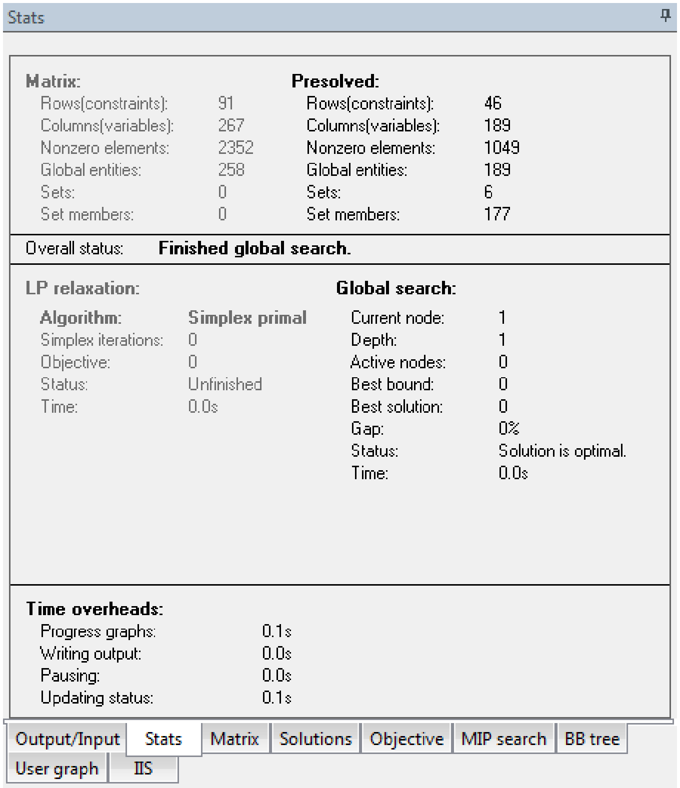
5 cestujících přijíždějících do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 2 a přestupující na linku č. 1 bude čekat 0 minut a 1 cestující přestupující na linku č. 3 bude čekat také 0 minut. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 2 tedy vznikne časová ztráta opět s hodnotou 0 ztrátových osobominut.

1 cestující přijíždějící do přestupního uzlu spojem č. 1 linky č. 3 a přestupující na linku č. 2 bude čekat 0 minut. Při čekání cestujících ze spoje č. 1 linky č. 3 tedy vznikne časová ztráta opět 0 ztrátových osobominut.

Sečteme-li všechny tři hodnoty časových ztrát vztahujících se ke všem linkám, dostáváme celkovou časovou ztrátu 0 ztrátových osobominut, což odpovídá hodnotě účelové funkce.

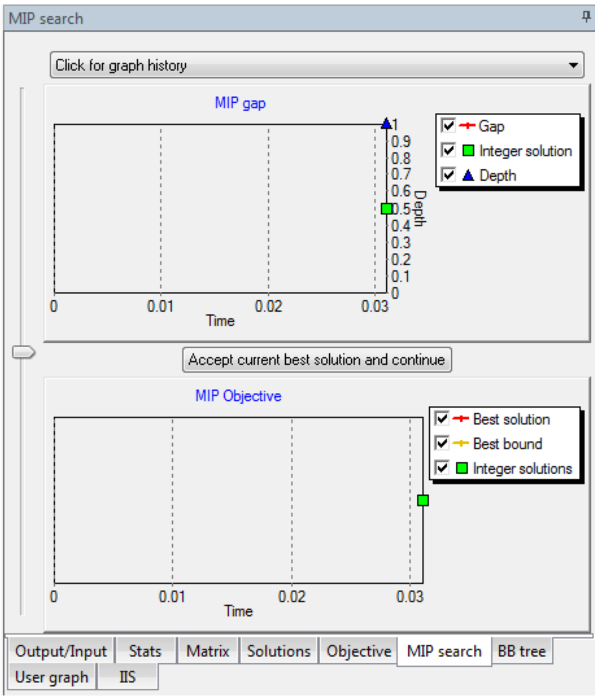
Jak je na obrázku č. 8 patrné, platí pro hodnotu $h_{311} = 20$. Znamená to, že při čekání ze spoje č. 1 linky č. 3 vzniká čekání ve výši 20 ztrátových osobominut. Přitom ale celková časová ztráta všech přestupujících cestujících je nulová. Skutečnost, že hodnota proměnné h_{311} byla nastavena na hodnotě 20 minut je způsobena tím, že ze spoje č. 1 linky č. 3 nikdo na linku č. 1 nepřestupuje, tedy platí, že 0·20 = 0 ztrátových osobominut.

Na obrázku č. 9 je možno vidět stavové hlášení z optimalizačního software, které mimo jiné dokumentuje také nalezení optimálního řešení. Hlášení o nalezení optimality je možno najít v položce *Status*.



Obrázek č. 9 Stavové hlášení z optimalizačního software

Na obrázku č. 10 je vidět průběh optimalizačního výpočtu v čase. Optimalizační výpočet trval 0,03 s, přičemž optimální řešení bylo nalezeno v čase 0,03 s od jeho zahájení.



Obrázek č. 10 Průběh optimalizačního výpočtu v čase

6.4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Ve výpočetní části byly realizovány tři výpočetní experimenty s modelovými daty. Výpočetní experimenty byly zaměřeny na ověření funkčnosti navrženého modelu a dále byla u všech experimentů sledována hodnota výpočetního času.

Počty linek byly ve všech experimentech stejné – jednalo se o tři linky. Stejně tak byly stejné i počty spojů vypravené na všechny linky – na každé lince byly vedeny dva spoje. Jediné, v čem se experimenty od sebe lišily, byla kapacita přestupního uzlu, v němž koordinace spojů probíhala. Nejnižší kapacita přestupního uzlu byla nastavena na hodnotě 1 spoj (nebylo možno zajistit umístění více než jednoho spoje do každé minutové časové polohy), ve druhém experimentu byla kapacita zvýšena na 2 spoje a ve třetím experimentu byla kapacita zvýšena na 3 spoje. Další zvyšování kapacity nebylo nutné, neboť počínaje kapacitou přestupního uzlu čítající 3 spoje bylo dosaženo nulové časové ztráty přestupujících cestujících.

Byla zformulována hypotéza, že s rostoucí kapacitou přestupního uzlu se snižuje hodnota časové ztráty přestupujících cestujících. Tato hypotéza byla prostřednictvím výpočetních experimentů potvrzena. Při kapacitě přestupního uzlu 1 spoj dosáhla hodnota časové ztráty 217 ztrátových osobominuty, při kapacitě přestupního uzlu 2 spoje došlo ke snížení časové ztráty na 21 minut a při kapacitě přestupního uzlu 3 spoje došlo ke snížení časové ztráty na 0 ztrátových osobominuty.

Je tedy možno konstatovat, že navrhovaný model je funkční a umožňuje v jednoduchých případech realizovat koordinaci spojů v uzlech s omezenou kapacitou. Jeho využití je smysluplné tehdy, když počet koordinovaných linek přesáhne kapacitu přestupního uzlu.

7 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce byla věnována časové koordinaci spojů v přestupních uzlech založené na využití matematických modelů.

V úvodní části práce jsou v obecné rovině popsány charakteristické rysy městské hromadné dopravy a je charakterizován význam časové koordinace. Rovněž jsou rozebrány typy časové koordinace a jsou stručně shrnuty poznatky z předchozích prací řešených na Institutu dopravy v oblasti časové koordinace.

V návrhové části je představen nově vytvořený model, který umožňuje realizovat časovou koordinaci spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou, což je problematika, které ještě nebyla v pracích, zpracovávaných na Institutu dopravy v minulosti, věnována pozornost.

Prezentovaný matematický model je navržen pro jednodušší provozní poměry, kdy je na koordinovaných linkách zaveden jednotný tak o délce 20 minut a přestupuje se pouze z prvního spoje. Samozřejmě je možné, daný typ modelu rozšířit o delší časové období, např. na celou hodinu. Tento případ však již do práce zařazen nebyl.

V dalším postupu je zapotřebí zaměřit se právě na rozšíření počtu spojů, které mají být koordinovány, řešit problematiku zavedení různých taktů na jednotlivých linkách a rozšířit model o možnost koordinace spojů ve více uzlech. V této souvislosti je možné uvažovat i o tom, že by se v pravidelném jízdním řádu spojů objevovaly za účelem zajištění přestupů také pobyty spojů, tzn. situace, kdy čas příjezdu spoje do přestupního uzlu a čas jeho odjezdu z přestupního uzlu budou různé hodnoty (v MHD se např. tento koncept zpravidla neuplatňuje). Zavedení pobytu spoje v přestupním uzlu je, samozřejmě, možné pouze v případech, že pobyt spoje neomezuje spoje jiné, příp. nezabraňuje účelnější koordinaci.

8 POUŽITÁ LITERATURA

[1] TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace technologických procesů.* Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2012. 103 s. [online]. Dostupné z: http://issuu.com/michdor/docs/m14_text

[2] ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava: VEDA, 1991. 279 s. ISBN 80-224-0099-8.

[3] JANÁČEK, Jaroslav. *Optimalizace na dopravních sítích.* Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2003. 248 s. ISBN 80-8070-031-1.

[4] MARTINIK, Jan. *Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava.* Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2014

[5] WINKLER, Jan. *Časová koordinace spojů na úsecích dopravních sítí.* Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2011

[6] LAŠÁKOVÁ, Kateřina. *Optimalizace veřejné dopravy Rýmařovska.* Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2015

[7] www.fico.com

[8] http://www.vvvd.cz/m14-optimalizace-technologickych-procesu-29.html

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK